

30° 视向角硬质内窥镜光学设计

张树青, 王庆晨, 智喜洋*, 黄源欣

哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 为了增加硬质内窥镜的有效视场, 便于手持操作, 节约成本, 需要对现有硬质内窥镜的性能进行改进。首先, 分析国内外硬质内窥镜的发展现状以及存在的主要问题, 对比相关产品提出设计要求; 接着, 提出一种 30° 视向角硬质内窥镜的设计方法; 然后, 在分析目前市场上各类硬质内窥镜转向系统结构的基础上, 提出使用全反射棱镜设计 30° 视向角内窥镜的方法; 最后, 结合相应标准对设计结果进行公差分析与像质评价。设计结果表明: 所设计内窥镜的总长度为 365 mm; 口径小于 6 mm; 视场角为 $\pm 40^\circ$; 物方分辨率为 12 lp/mm, 接近衍射极限; 能量分布均匀。考虑加工和装调误差, 进行公差分析后结果显示像质满足用户需求。设计结果基本能够满足实际使用需求, 达到设计要求, 对硬质高质量医用内窥镜的国产化具有工程应用意义。

关键词 光学设计; 硬质内窥镜; 视向角; 全反射

中图分类号 TH773

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0222002

Optical Design of Rigid Endoscope with 30° Viewing Angle

Zhang Shuqing, Wang Qingchen, Zhi Xiyang, Huang Yuanxin

Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract In order to increase the valid view of field, make it easy for using, and save cost, it's necessary to improve the performance of the existing rigid endoscope. Firstly, the development status and main problems of rigid endoscopes at home and abroad are analyzed. And the design requirement is proposed by comparing related product. Next, a design method of 30° viewing angle rigid endoscope is proposed. Then, on the basis of the analysis of the current steering system structure of all kinds of rigid endoscope on the market, a method of designing the 30° viewing angle endoscope with total reflection prism is proposed. Finally, the tolerance analysis and image quality evaluation are carried out according to the corresponding standard. The design results show that the total length of the designed endoscope is 365 mm. The diameter is less than 6 mm. The angle of the field of view is $\pm 40^\circ$. And the object space resolution is 12 lp/mm, which is close to the diffraction limit. The energy distribution is uniform as well. Considering the processing and assembly error, the results show that the image quality can still meet the user needs after the tolerance analysis. The design results can basically meet the actual use needs and the design requirements, which have engineering application significance for the localization of high quality medical rigid endoscope.

Key words optical design; rigid endoscope; viewing angle; total reflection

OCIS codes 220.3620; 170.2150

1 引 言

硬质内窥镜是微创手术的主要工具, 其经历了较长时间的发展和改进^[1]。目前硬质内窥镜市场大部分由国外品牌占有, 标志性产品有德国的 Worf 公司研发的无畸变的 ENDOCAM Epic3DHD

系统, 日本 Olympus 公司生产的可实现不同方向 100° 弯曲、景深 18~100 mm 的 EndoeyeFlex3D 内窥镜, 以及德国 Karl Storz 公司的可变换视野方向 15°~90° 以及 0°~120° 的 EndoCAMeleon 内窥镜。国内品牌有沈阳沈大、杭州好克、桐庐医疗、浙江天松等。

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(20873999)

作者简介: 张树青(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事空间遥感光学系统设计、极紫外光刻收集系统、医用内窥镜方面的研究。E-mail: sq.zhang@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn

目前国内的许多内窥镜厂商已经拥有了完备的生产线,但是在成像质量、耐用性、功能等方面有所欠缺,还无法与国际顶尖厂商抗衡。国内产品经过多次高温高压消毒之后使用效果下降明显,这个问题主要源于一些不合理的设计,例如密封使用密封胶而不使用较为牢固的激光焊接技术^[2];加工能达到的质量有限,使得转向棱镜反射膜的使用寿命较短等。

在内窥镜的视向角选择方面:目前的产品视向角有 0° , 5° , 12° , 30° , 70° , 90° 等,由于病灶位置的不同,医生可以根据需要选择合适的内窥镜。根据实际情况, 30° 的内窥镜应用相对较为广泛。对于非零度视向角的产品,只要视向角不超过半视场角,就可以看到轴向物体,相当于在增加可视范围的同时避免了设计大视场角的困难。

本文提出了一种利用全反射棱镜作为转向结构的 30° 视向角硬质内窥镜的设计,与传统镀膜棱镜相比,避免了因膜层损耗而减少内窥镜的使用寿命。在设计过程中使用了 Zemax 软件,结果显示所设计内窥镜物方分辨率可达到 12 lp/mm ,设计指标达到了高清成像的要求。

2 技术要求与需求分析

表1所示为系统设计要求,指标分析如下。目前市面上的硬质内窥镜包含多种视向角,在普遍的使用情况下, 30° 视向角的内窥镜既能观察到中心视场的情况,又能够提供比 0° 视场更广的视野范围,符合医生的使用需求和使用习惯,因此将所设计的

视向角选定为 30° 。

表1 系统设计要求

Table 1 System design requirements

Parameter	Design requirement
Field of view / ($^{\circ}$)	± 40
$F / \#$	6
View angle / ($^{\circ}$)	30
Total length / mm	> 300
Object resolution / ($\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$)	> 12
Relative distortion / %	$< 25\%$
Working distance / mm	25
Diameter / mm	< 6

在评价内窥镜分辨能力时,通常使用调制传递函数(MTF)值^[3]。腹腔镜视觉分辨率大多小于 10 lp/mm ,内窥镜光学系统的理论中心分辨率可以表示为:

$$N_r = \frac{D}{1.22\lambda d}, \quad (1)$$

式中 λ 为工作波长, D 为系统的入瞳直径, d 为系统的工作距离, N_r 的单位为 lp/mm 。

根据文献[4]提出的几款常见内窥镜的空间分辨率及MTF阈值(见表2),可以看出国产内窥镜的空间分辨率普遍在 10 lp/mm 以下,因此选取系统 $F/\#=6$,焦距 3 mm 。设计提出内窥镜空间分辨率大于 12 lp/mm 时,在上述产品中能够达到高分辨率标准。系统焦距 f 与系统工作距离 d 的比值为物像方分辨率比值,经过换算得出系统像方分辨率可以达到 100 lp/mm 。

表2 产品空间分辨率及MTF阈值

Table 2 Spatial resolution and MTF threshold of products

Number	Brand	View angle / ($^{\circ}$)	Type	Spatial resolution / ($\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$)	MTF threshold (total)
1	LUT	0	Sinus endoscope	9	0.2619
2	LUT	30	Sinus endoscope	8	0.3607
3	LUT	70	Sinus endoscope	8	0.5506
4	SHENDA	12	Cervical endoscope	5	0.5439
5	SHENDA	22	Cervical endoscope	5	0.5182
6	Olympus	70	Cystoscope	10	0.4505
7	Olympus	70	Cystoscope	11	0.1942
8	Rudolf	30	Cystoscope	10	0.2841
9	STORZ	30	Cystoscope	16	0.2364

由于使用场合的特点,内窥镜的外径需要限制在 10 mm 以内,留出 2 mm 的外部金属管壁厚余量后,要求光学系统口径小于 6 mm 。同时由于操作需要,硬质内窥镜要求工作长度大于 300 mm 。通常 $2.7\sim 3.0\text{ mm}$ 内窥镜视场角在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间, 4.0 mm 内

窥镜视场角在 $70^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 之间,其他外径的内窥镜视场角介于 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间,一些超广角内窥镜的视场角可达 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 之间。过大的视场角在设计时会导致相对畸变很大,不满足使用要求。考虑到所设计内窥镜的 30° 视向角有增大视野范围的作用,根

据用户要求,将视场角规定为 $\pm 40^\circ$ 。由于设计的视场角较大,手术中对于视场中心像质要求较高,在设计时适当放宽对边缘畸变的要求,畸变可通过图像处理等方法进行校正^[5]。

3 系统设计与分析

3.1 初始结构选择

在整个系统中,物镜需要承担大视场角的作用,且焦距较短,因此在设计时采用反远距的结构,物镜第一面作为保护玻璃。转像系统使用 Hopkins 棒状镜,其优点有:1)相对空气介质可以提高折射率,增大相对孔径,使光线的损失减少;2)棒状镜长度较长,相对薄透镜更易于装配和调整;3)棒状镜作为转像系统为对称结构,不会在系统中引入轴上像差,利于优化。提供 30° 视向角的转向结构采用棱镜结构,利用全反射原理,有如下优势:1)避免了因消毒、碰撞等原因导致的反射膜层脱落、划伤,可以延长仪器使用寿命;2)避免了因镀膜产生的加工难度,降低了加工成本;3)棱镜利于装配。

3.1.1 物镜结构选择

物镜采用负正透镜组分离的反远距系统^[6]形式:物镜的前组为负透镜组,后组为正透镜组,入射的光线先经过前组负透镜发散,再经过后组正透镜会聚成像到焦面上。图 1 为物镜初始结构。

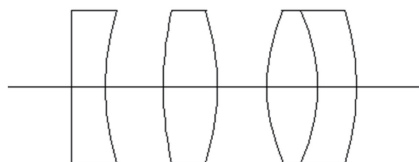


图 1 物镜初始结构

Fig. 1 Initial structure of objective lens

3.1.2 转像系统结构

转像系统选用 Hopkins 棒状镜^[7],由于转像系统放大倍率为 -1 ,因此选用奇数组棒状镜,由于系统长度限制,使用三组即可达到要求。初始棒状镜由两个较薄的负透镜和一个较厚的双凸透镜组成;棒状镜的结构中负透镜可以校正球差和色差,镜组间距的调整可以校正像散。每一组的结构如图 2 所示。

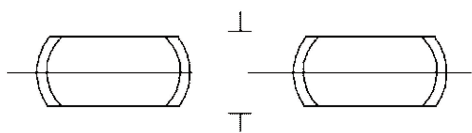


图 2 棒状镜初始结构

Fig. 2 Initial structure of rod lens

3.1.3 转向棱镜方案分析与设计

目前非零度视向角内窥镜的转向结构以棱镜为主,主要分为折射式和反射式棱镜。折射式棱镜受材料限制较大,极易引入各种像差,且光线偏折角度有限,因此在实际使用中仅用于视向角较小的前视型内窥镜。反射式棱镜大多采用镀反射膜的方法,利用五棱镜、楔形棱镜^[8]等可实现多种视向角。

对于图 3 所示的转向棱镜位于系统最前的情况,对于折射式棱镜,光线偏折的角度有限,只能在一个很小的视场范围内观察;对于反射式棱镜,要想实现光经过棱镜的上下表面反射,在入射光的角度已经被限定的情况下,无法实现大视场范围的观察,并且转向棱镜前置没有保护玻璃的保护,极易被损坏。

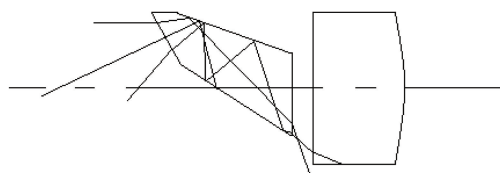


图 3 转向棱镜前置

Fig. 3 Preposition of steering prism

如图 4 所示为技术较为成熟的转向棱镜系统,其中 1 为保护玻璃,2 为第一物镜,3 为转向棱镜,4 为第二物镜。可调视向角结构在软质内窥镜中常见,而硬质内窥镜多为固定视向角。

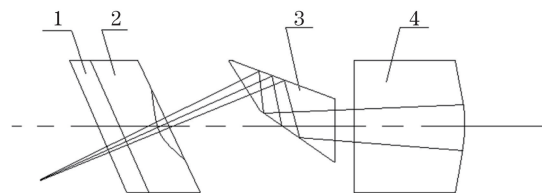


图 4 反射式转向棱镜

Fig. 4 Reflecting steering prism

为了使图 4 所示的内窥镜结构稳定,在装调上通常使用三胶合的方式填充转向棱镜与前后物镜之间的空缺,如图 5 所示。其中包括保护玻璃 1,第一物镜 2,a 视向角棱镜 3,b 视向角棱镜 4,c 视向角棱镜 5,第二物镜 6。在这种装配方式下,需要为转向棱镜镀上银膜增大反射率,因此增加了系统实现的难度,并且镀膜的厚度等因素也会影响成像质量。

平面反射镜多用于直接观察,如口腔检测中使用的口镜。利用平面反射镜作为转向系统的内窥镜在实际应用中并不常见,主要在于光路中调整和固定平面镜存在困难;单片平面镜会引入镜像问题,和日常习惯不同,造成操作上的不便。

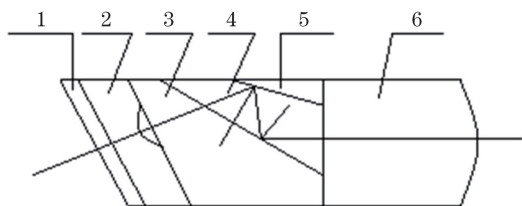


图 5 含棱镜物镜组装配

Fig. 5 Assemble of objective lens with prism

设计提出的利用全反射原理采用转向棱镜的方法解决了镀反射膜的技术难点,避免了镀膜可能脱落导致的使用寿命受限问题;同时加工与调整方便,更符合生产实际要求,具有广泛的应用前景。

在设计棱镜时,与前面提及的方案对比,将棱镜置于物镜组中实现转向,棱镜前有一片负透镜以及一片平板作为窗口,并承担光焦度。为了实现 30° 的视向角,首先根据几何关系确定棱镜的上下反射表面与水平面夹角分别为 15°,20°。

为了满足全反射棱镜的设计要求,需要对全反射条件进行计算。在设计反射棱镜时选用 BK7 作为棱镜材料,降低生产成本的同时折射率也较高。根据折射定律:

$$n \sin I = n' \sin I', \quad (2)$$

可以得到全反射临界角 I_c :

$$I_c = \arcsin \frac{n'}{n}, \quad (3)$$

式中 n' 为空气折射率, n 为棱镜材料折射率。计算得到 $I_c = 41.245^\circ$ 时,所设计的棱镜光线经过两次反射,因此只要满足两次入射角大于临界角即可。

经过计算,各视场上下边缘光线在棱镜两个反射面上的入射角如表 3 所示。

表 3 棱镜入射角

Table 3 Incident angle of prism

Field of view	Incident angle of upper reflection surface / (°)	Incident angle of lower reflection surface / (°)
-40° upper edge ray	55.20	69.70
-40° lower edge ray	63.15	77.75
0° upper edge ray	51.05	66.60
0° lower edge ray	58.75	73.25
40° upper edge ray	47.05	62.05
40° lower edge ray	54.80	69.70

根据计算结果,各视场的最小入射角都大于全反射临界角 41.245°, 小于 90°, 表面可以满足设计要求。

棱镜设计后的最终结构如图 6 所示。

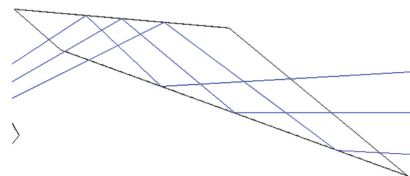


图 6 棱镜结构

Fig. 6 Prism structure

在棱镜装配过程中需要进行一体化封装以保持棱镜位置固定,其中棱镜上下两片镜片仅起固定作用,利用装配时棱镜之间的空气层实现全反射。所设计的光学系统已完成实际加工,棱镜部分结构如图 7 所示。

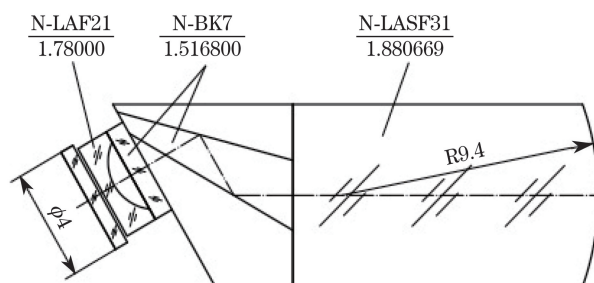


图 7 全反射棱镜装配图

Fig. 7 Assembly drawing of total reflection prism

3.2 优化设计

所设计的内窥镜是一种组成部分较多的光学系统,每一部分的像差都会对整个系统的像质产生影响。因此在设计中采取先部分后整体的设计思路,即先分别进行物镜、转像系统的设计优化,再进行整体设计优化^[9]。在优化的过程中,针对畸变等对系统像质影响较大的像差再进行重点优化。

在优化过程中,对焦距、总长、畸变等参数进行限制,最终得到设计结果。

4 设计结果与评价

4.1 设计结果

经过整体优化后结构如图 8 所示。



图 8 整体结构

Fig. 8 Integral structure

物镜及棱镜部分结构如图 9 所示。棒状镜部分结构如图 10 所示。MTF 曲线如图 11 所示。100 lp/mm 处 MTF 曲线如图 12 所示。

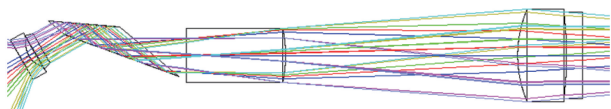


图 9 包含棱镜的物镜结构
Fig. 9 Objective lens structure with prism



图 10 棒状镜结构
Fig. 10 Structure of rod lens

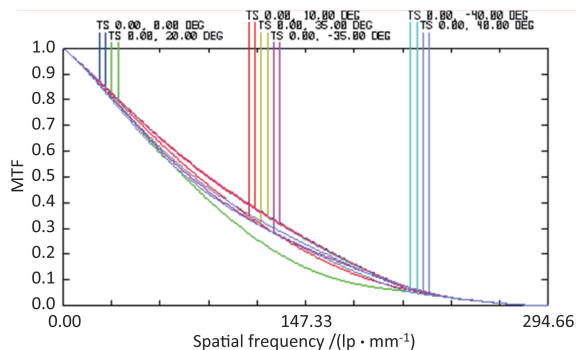


图 11 截止频率处 MTF
Fig. 11 MTF at the cutoff frequency

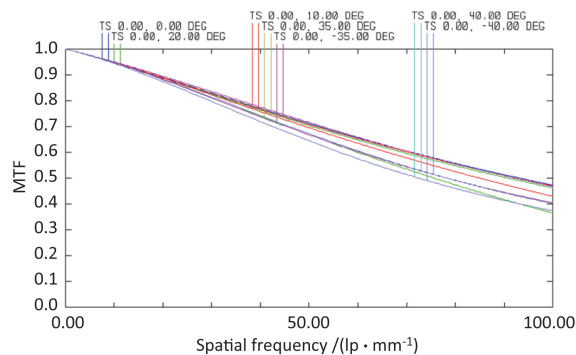


图 12 100 lp/mm 处 MTF
Fig. 12 MTF at 100 lp/mm

点列图如图 13 所示。

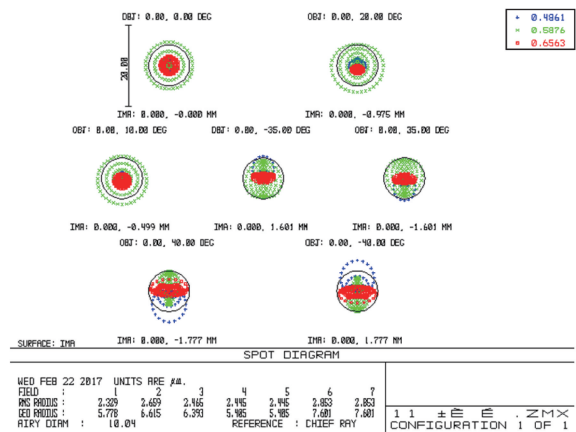


图 13 点列图
Fig. 13 Spot diagram

畸变曲线如图 14 所示。

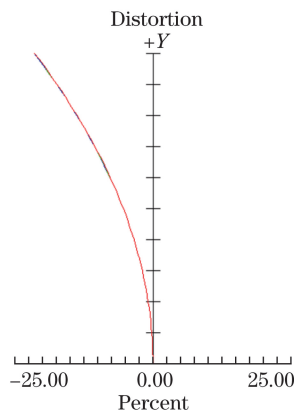


图 14 畸变
Fig. 14 Distortion

4.2 公差分析

根据标准[10-12]所述的医用内窥镜及附件通用要求:光学内窥镜视场角与名义值偏差不大于 15%;光学硬质内窥镜视向角与名义值偏差不大于 10%;根据经验以及目前能达到的加工精度选取曲率半径公差、厚度公差、平行偏心公差、倾斜偏心公差、折射率和阿贝数的公差^[13]进行公差分析,取值表 4 所示。

表 4 公差容限值

Table 4 Tolerance value

Tolerance	Range
Radius	2 rings
Thickness	0.03 mm
X direction surface parallel eccentricity	0.03 mm
Y direction surface parallel eccentricity	0.03 mm
X direction element parallel eccentricity	0.03 mm
Y direction element parallel eccentricity	0.03 mm
X direction surface tilt eccentricity	0.05°
Y direction surface tilt eccentricity	0.05°
X direction element tilt eccentricity	0.05°
Y direction element tilt eccentricity	0.05°
Refractive index	0.001
Abbe number	1

在 100 lp/mm 处进行蒙特卡罗公差分析的结果如表 5 所示,可以看出 MTF 阈值有 90%能够达到 0.1024 以上,在公差要求范围内可以进行加工与使用。

4.3 像质评价

上述结果表明所设计的内窥镜实现了预定的要求(表 1)。根据图 12:内窥镜在 100 lp/mm 处的 MTF 大于 0.35,接近衍射极限;图 11 所示截止频率

表 5 公差分析结果

Table 5 Tolerance analysis result

Probability	MTF threshold
90%	≥ 0.102442047
50%	≥ 0.145729620
10%	≥ 0.238108653

达到了 294 lp/mm, 经过换算中心频率超出了 12 lp/mm 的设计要求; 图 13 点列图所示全视场的弥散斑均方根(RMS)半径为 2.85 μm , 像质较好。图 14 显示的全视场的畸变控制在 25% 以内, 能满足日常使用及设计要求。

5 结 论

针对目前市场上硬质内窥镜的使用情况和用户需求, 本文提出了一种利用全反射棱镜设计的 30° 视向角硬质内窥镜, 分别对物镜、转像系统、目镜以及转向棱镜进行设计, 最后经过整体优化, 得到的结果如下: 系统的物方分辨率达到了 12 lp/mm, 全视场畸变小于 25%, 系统总长为 365 mm, 入瞳直径为 0.47 mm, 出瞳距为 4.86 mm, 视向角为 30°, 视场角为 $\pm 40^\circ$, 口径小于 6 mm。经过公差分析和像质评价, 结果表面设计满足生产加工要求, 具有实际应用价值。经过像质分析可以看出, 产品实现了高清成像需求, 与同类产品相比, 减少了加工时镀反射膜的繁琐程序, 具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Shi G H. Brief introduction to the development of endoscopic technology[J]. Medical and Health Care Instruments, 2005(1/2): 53.
石国华. 内窥镜技术发展简述[J]. 医疗保健器具, 2005(1/2): 53.
- [2] Chen C. Medical rigid endoscope optical system design[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
陈冲. 医用硬性内窥镜光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [3] Wang Y L, Ji J, Jiang C S, *et al.* Study of image quality comparison based on the MTF method between different medical rigid endoscopes in an in vitro model[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2015, 32(2): 357-362.
王云龙, 姬军, 蒋昌松, 等. 基于调制传递函数的硬性内窥镜成像质量对比研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2015, 32(2): 357-362.
- [4] Ji J, Jiang C S, Hou C W, *et al.* Research on evaluation of medical rigid endoscope's resolution based on MTF[J]. China Measurement & Test, 2014, 40(6): 14-16.
姬军, 蒋昌松, 侯纯伟, 等. 基于 MTF 评价医用硬性内窥镜的分辨率[J]. 中国测试, 2014, 40(6): 14-16.
- [5] Hu M Y, Li M J, Zhao Q, *et al.* Design and imaging distortion correction of pin-hole objective lens with large field[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0522002.
胡明勇, 李明杰, 赵奇, 等. 大视场针孔物镜设计及成像畸变校正[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0522002.
- [6] Liu J, Gao M. Optical design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 152-153.
刘钧, 高明. 光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 152-153.
- [7] Tomkinson T H, Bentley J L, Crawford M K, *et al.* Rigid endoscopic relay systems: a comparative study[J]. Applied Optics, 1996, 35(34): 6674-6683.
- [8] Zhang L Y, Cheng D W, Wang Y T. Integration design of rigid endoscope with different viewing angles[C]. Department of Optoelectronic Engineering, 2016.
- [9] Yu L, Cheng D W, Zhou W, *et al.* Optimization design of rigid endoscope with high definition and large depth of field[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 30(11): 1122003.
禹璐, 程德文, 周伟, 等. 大景深高清硬性内窥镜光学系统的优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1122003.
- [10] National medical optics and apparatus standard chemical sub-committee. GB 11244—2005 General requirements for the medical endoscope and endoscope accessories[S]. Beijing: Standards Press of China.
全国医用光学和仪器标准化分技术委员会. GB 11244—2005 医用内窥镜及附件通用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [11] National medical optics and apparatus standard chemical sub-committee. YY 0068.1—2008 Medical endoscope—rigid endoscope—Part1: optical properties and test methods[S]. Beijing: Standards Press of China.
全国医用光学和仪器标准化分技术委员会. YY 0068.1—2008 医用内窥镜 硬性内窥镜 第 1 部分: 光学性能及测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] Certification and accreditation administration of the People's Republic of China. SNT 1095—2002 Rules for the inspection of the performance of medical endoscopes for import[S]. Beijing: Standards Press of China.
中国国家认证认可监督管理委员会. SNT 1095—2002 进口医用内窥镜性能检验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [13] Tan J. The design of oto-endoscope system[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015.
谈进. 耳内窥镜系统的设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.